

МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ ОПТИМИЗАЦИИ ЭНЕРГОУТИЛИЗАЦИОННЫХ СХЕМ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ АГРЕГАТОВ

А.А. Оленников

ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный индустриальный университет»
(г. Новокузнецк, Россия)

Рассмотрен прогноз уровня цен на российские энергоносители, который заставляет задумываться над проблемой энергосбережения, особенно в металлургической промышленности. В связи с этим актуальной задачей является эффективное использование энергии исходного топлива в металлургических процессах. Предложен комбинированный способ утилизации энергии отходящих газов, когда избыток тепла от металлургических агрегатов используют как для внутреннего регенеративного, так и для внешнего энергоиспользования. Разработаны алгоритмы, позволяющие находить оптимальный вариант энергоутилизации отходящих газов металлургических агрегатов с учетом достижения высокого значения сквозного коэффициента использования энергии исходного топлива и экономического эффекта от выбранной схемы энергоутилизации. Предложен способ оптимизации геометрических характеристик каждого аппарата, входящего в энергоутилизационную схему. В данной работе этот способ рассмотрен на примере котла-утилизатора.

Ключевые слова: сквозной коэффициент использования энергии исходного топлива, комплекс моделей, котел-утилизатор, конвективный пучок, сложный теплообмен, местное сопротивление, газодинамический расчет.

Considered forecast of prices for russian energy, which causes a problem to think about energy efficiency, especially in the steel industry. In this regard, an actual problem is the efficient use of energy source fuel in metallurgical processes. We propose a combined method of energy recovery of waste gases, when excess heat from the metallurgical equipment used for internal regenerative, and external energy use.

The algorithms that allow to find the optimal variant of energy recovery of waste gases of metallurgical units with the achievement of high values through utilization of fuel and energy of the original economic benefit of the chosen scheme of energy recovery. A method of optimizing the geometrical characteristics of each device included in the power circuit. In this paper, this method is considered as an example of the recovery boiler.

Keywords: through utilization of energy fuel source, complex models, recovery boiler, convection beam, complex heat transfer, local resistance, gas-dynamic calculation.

Мировой энергетический кризис уже сейчас, повышая цены на энергоносители, вносит существенные изменения в структуру топливного баланса, в том числе металлургического производства и мировую торговлю металлом. Только за последние 20 лет мировое потребление энергии увеличилось почти на 40 %, и составило около 10 млрд т у.т.

В черной металлургии используются практически все известные на Земле виды энергии. Одинаковую продукцию (чугун, сталь) можно получить с использованием различных технологических схем и отличных по своей природе источников энергии. Многие из применяемых энергоносителей

взаимозаменяемы. Так, например, в энергетическом балансе доменного процесса за счет более интенсивного использования пылеугольного топлива и природного газа можно существенно снизить расход энергоемкого кокса. В сталеплавильном производстве получают сталь мартеновским способом с использованием природного топлива (природного газа, мазута), конвертерным (автотермический процесс – использует энтальпию и химическую энергию чугуна) или электродуговым способом. При этом возникает проблема выбора оптимальных источников энергопотребления (природный газ, кокс, мазут или электроэнергия).

Как отмечают многие аналитики, начиная с 2004 г. темпы роста мирового производства стали резко увеличились – в основном за счет расширения производства металлопродукции в странах Латинской Америки и Азии (особенно Китая). В условиях высокой степени монополизации рынка сырьевых ресурсов поставщики сырья и топлива не смогли обеспечить адекватного уровня предложения кокса, железной руды и металлолома. В результате цены на сырье резко увеличились. В течение короткого промежутка времени цены на железную руду возросли на 18–20 %, на коксующийся уголь – 25–35 %, на кокс – в три раза, металлолом – в два раза. Российские специалисты в ближайшие десять лет ожидают увеличения стоимости энергетических и коксующихся углей в 1,6, электроэнергии – 1,7, а природного газа – 2,2 раза. В табл. 1 Министерством экономики России представлен прогноз средней стоимости уровня цен на энергоносители [1]. При этом стоимость единицы энергии природного газа будет почти в 4,4 раза меньше стоимости электрической энергии. Поэтому в ближайшем будущем следует ожидать резкого увеличения стоимости природного газа и мазута не только на мировых, но и на внутреннем рынке России.

Таблица 1

Прогноз уровня цен на российские энергоносители

Вид энергии	Средняя стоимость		
	2005 г.	2010 г.	2015 г.
Уголь, руб/т (руб/ГДж)	940 (42,73)	1300 (59,09)	1535 (69,77)
Природный газ, руб/тыс. м ³ (руб/ГДж)	1240 (36,60)	2405 (71,00)	2745 (81,02)
Электроэнергия, руб/кВт·ч (руб/ГДж)	0,745 (42,73)	1,123 (311,94)	1,302 (361,67)

В связи с этим актуальной задачей является эффективное использование энергии исходного топлива в металлургическом переделе. Речь идет о глубоком использовании физической и химической энергии, возникающей в ходе технологического процесса, в том числе содержащейся в отходящих газах. Более подробно остановимся на последнем.

Существует ряд методов использования теплоты отходящих газов [2]. Наиболее предпочтительным является комбинированный способ, когда из-

быток тепла от металлургических агрегатов используют как для внутреннего регенеративного, так и для внешнего использования. Полученная тепловая энергия может использоваться как в самом процессе (подогрев сырья, окислителей, шихты), так и для других целей. Для того чтобы выполнить проект любого варианта утилизации энергии отходящих газов, а также выбрать из них оптимальный, требуется решить множество задач, которые представлены в виде структуры на рис. 1.

Для оценки параметров выходной продукции металлургического агрегата, работающего по определенной технологии, возникает необходимость создания модели на базе материальных и тепловых балансов. На этом этапе определяются параметры выходной продукции металлургического агрегата, – состав получаемого металла и его количество, параметры отходящего газа (объем, температура, давление, качественный состав и режим подачи).

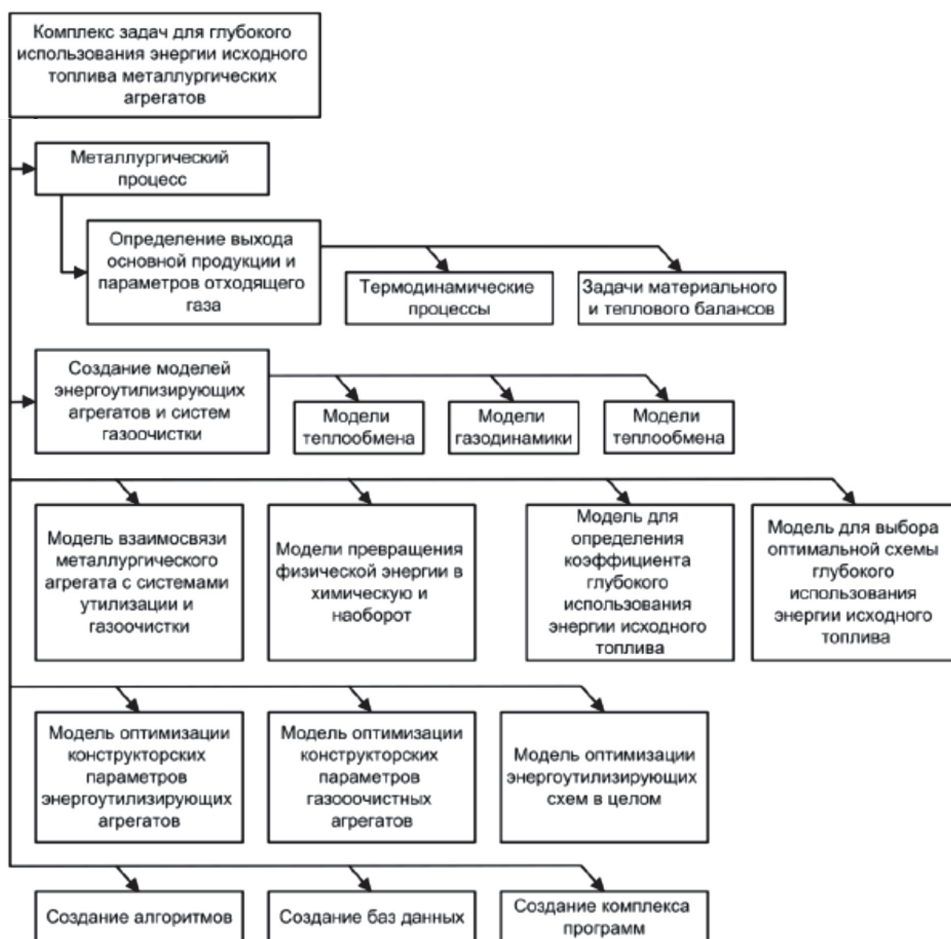


Рис. 1. Структура комплекса задач, ориентированных на решение глубокого использования энергии исходного топлива

Следующая ступень – необходимость создания математических моделей энергоутилизирующих и газоочистных систем. Здесь можно выделить три основных уровня:

Первый: процессы в отдельных конструктивных элементах теплоиспользующих агрегатов и системах газоочистки (пучках труб, соединительных каналах и т.д.). Здесь в качестве элементарных систем рассматриваются процессы сложного теплообмена между тепловоспринимающими элементами и средами, процессы трения газа о стенки, различные местные сопротивления и т.п.

Второй: теплоутилизирующие агрегаты в целом. Они состоят из описанных выше конструктивных элементов. И, следовательно, вид сложной системы этого (второго) уровня зависит от сочетания и способа соединения отдельных конструктивных элементов (систем первого уровня). Примерами сложных систем второго уровня являются: котлы-утилизаторы, газовые турбины, агрегаты кипящего слоя и т.п.

Третий – комбинации описанных выше агрегатов, входящих в единую схему утилизации энергии.

В следующем блоке рассматривается взаимосвязь систем энергоутилизации и газоочистки с металлургическим агрегатом. На этом этапе устанавливается режимность работы энергоутилизирующих устройств.

В зависимости от состава отходящего газа и его параметров, изменяющихся после каждой ступени энергоутилизации, возникает необходимость создания моделей превращения физической энергии в химическую и наоборот. Например, при дожигании газа может образовываться совершенно иной его состав. Тот же самый эффект можно получить обогащая газ в реформере.

Каждая энергоутилизационная схема состоит из N числа энергетических и газоочистных аппаратов, которые проектируются независимо друг от друга. Если энергоутилизаторы установлены последовательно в энергоутилизационной схеме, то выходные параметры отходящего газа (температура, давление и химический состав) будут являться входными данными для последующей установки. На этапе разработки каждого аппарата важно максимально усвоить вторичную тепловую энергию Q , полученную от газов, при этом потери давления P в газовом тракте свести к минимуму. Такой подход даст возможность отказаться от более мощных дымососов, используемых в схемах энергоутилизации традиционной металлургии, или даже полностью исключить их из утилизационной схемы, например, если рассматривать металлургический процесс и агрегат типа СЭР [3].

Для этого необходимо разработать математическую модель оптимизации конструкций энергоутилизирующих и очистных аппаратов. На рис. 2 представлена структура алгоритма оптимизации применительно к котлу-утилизатору.

Изначально предлагается выполнить конструктивное описание котла или принять уже проработанный вариант, находящийся в базе данных конструкторской документации. На этом этапе задается тип конвективных поверхностей (рис. 3), расстояние между трубами (S_1, S_2, S_3), материал труб с учетом их шероховатости. Затем выполняется газодинамический расчет, где определяются потери давления в секциях агрегата. Коэффициенты местных

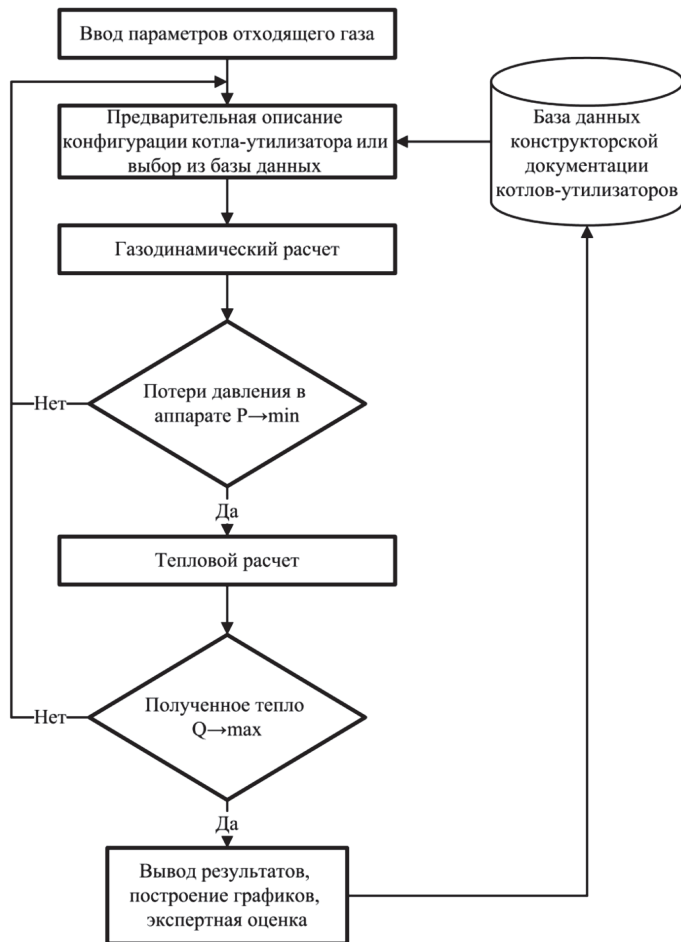


Рис. 2. Алгоритм оптимизации конструкторских параметров котла-утилизатора

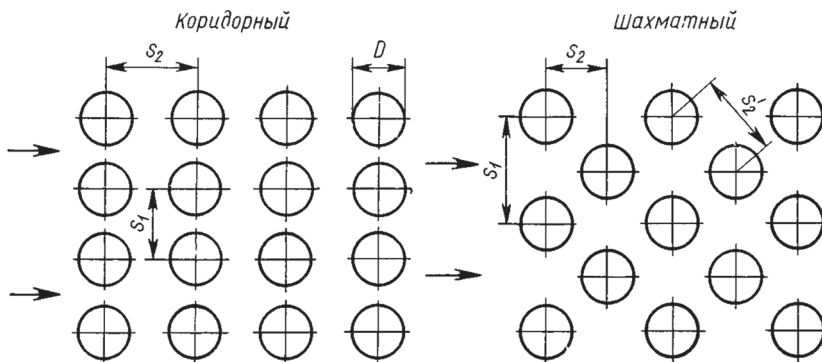


Рис. 3. Конфигурация конвективных поверхностей котла-утилизатора

Таблица 2

Коэффициенты местного сопротивления пучков труб

Для коридорного пучка труб	
Условие	Коэффициент местного сопротивления $\xi_{\text{КОР}}$
При $\sigma_1 \leq \sigma_2$ ($0,06 \leq \psi \leq 1$)	$\xi_{\text{КОР}} = 2(\sigma_1 - 1)^{-0,5} \cdot \text{Re}^{-0,2} \cdot z_2$
При $\sigma_1 > \sigma_2$ ($1 < \psi \leq 8$)	$\xi_{\text{КОР}} = 0,38(\sigma_1 - 1)^{-0,5} \cdot (\psi - 0,94)^{-0,59} \text{Re}^{-0,2/\psi} \cdot z_2$
При $\sigma_1 > \sigma_2$ ($8 < \psi \leq 15$)	$\xi_{\text{КОР}} = 0,118(\sigma_1 - 1)^{-0,5} \cdot z_2$
Для шахматного пучка труб	
При $\varphi > 1,7$ и $3 < \sigma_1 \leq 10$	$\xi_{\text{ШАХМ}} = 1,83\sigma_1^{-1,46} \cdot (z_2 + 1)$
При $0,1 \leq \varphi \leq 1,7$ и $\sigma_1 \geq 1,44$	$\xi_{\text{ШАХМ}} = 3,2 + 0,66(1,7 - \varphi)^{1,5} \text{Re}^{-0,27} \cdot (z_2 + 1)$
При $0,1 \leq \varphi \leq 1,7$ и $\sigma_1 < 1,44$	$\xi_{\text{ШАХМ}} = 3,2 + 0,66(1,7 - \varphi)^{1,5} +$ $+ \frac{1,44 - \sigma_1}{0,11} [0,8 + 0,2(1,7 - \varphi)^{1,5}] \text{Re}^{-0,27} (z_2 + 1)$

сопротивлений для каждого вида пучка труб определяются в зависимости от соотношения шагов и диаметров труб, а также условий, приведенных в табл. 2:

Для коридорного пучка труб:

$$\sigma_1 = \frac{S_1}{D}, \quad \sigma_2 = \frac{S_2}{D}, \quad \psi = \frac{S_1 - D}{S_2 - D}.$$

Для шахматного пучка труб:

$$\sigma_1 = \frac{S_1}{D}, \quad \varphi = \frac{S_1 - D}{S'_2 - D},$$

где S_1, S_2 – шаги труб по ширине и глубине пучка.

$$S'_2 = \sqrt{\frac{1}{4}S_1^2 + S_2^2} \text{ – диагональный шаг труб.}$$

Затем выполняется тепловой расчет котла, определяется количество выработанного тепла Q или паропроизводительность D . Цикл повторяется до тех пор, пока не будет найдена оптимальная конструкция котла-утилизатора. Завершается проектная стадия выводами расчетов, конструкторских чертежей и рекомендаций. Полученные результаты помещаются в базу данных конструкторской документации котлов-утилизаторов, предварительно пройдя экспертную оценку.

По завершению расчетов каждого энергоутилизатора выполняется комплексная оценка эффективности всей схемы энергоутилизации. Для этого предлагается модель, суть которой заключается в определении сквозного коэффициента использования энергии исходного топлива [4]. В общем виде этот коэффициент может быть представлен в виде формулы:

$$\eta_{\text{ЭИТ}} = \eta_{\text{АГР}}^{\text{ИСП}} + \eta_{\text{ГО}}^{\text{ИСП}} \cdot \eta_{\text{ГО}}^{\text{КПД}} + \eta_{\text{У1}}^{\text{ИСП}} \cdot \eta_{\text{У1}}^{\text{КПД}} + \eta_{\text{У2}}^{\text{ИСП}} \cdot \eta_{\text{У2}}^{\text{КПД}} + \dots + \eta_{\text{УN}}^{\text{ИСП}} \cdot \eta_{\text{УN}}^{\text{КПД}}, \quad (1)$$

где $\eta_{\text{АГР}}^{\text{ИСП}}$, $\eta_{\text{ГО}}^{\text{ИСП}}$, $\eta_{\text{У}}^{\text{ИСП}}$, $\eta_{\text{У}}^{\text{ИСП}}$, $\eta_{\text{У}}^{\text{ИСП}}$ — соответственно коэффициенты теплоиспользования металлургического агрегата, гарнисажного охлаждения и последовательно соединенных энергоутилизаторов и газоочистных систем; $\eta_{\text{ГО}}^{\text{КПД}}$, $\eta_{\text{У1}}^{\text{КПД}}$, $\eta_{\text{У2}}^{\text{КПД}}$, $\eta_{\text{УN}}^{\text{КПД}}$ — соответственно, коэффициенты полезного действия системы гарнисажного охлаждения, теплоутилизаторов и газоочистных систем.

На рис. 4 приведена блок-схема алгоритма оптимизации, позволяющая сравнивать энергоутилизационные схемы по сквозному коэффициенту использования энергии исходного топлива с готовыми вариантами, находящимися в базе данных. Рассматриваемые здесь модели относятся к третьему уровню, который упоминался выше.

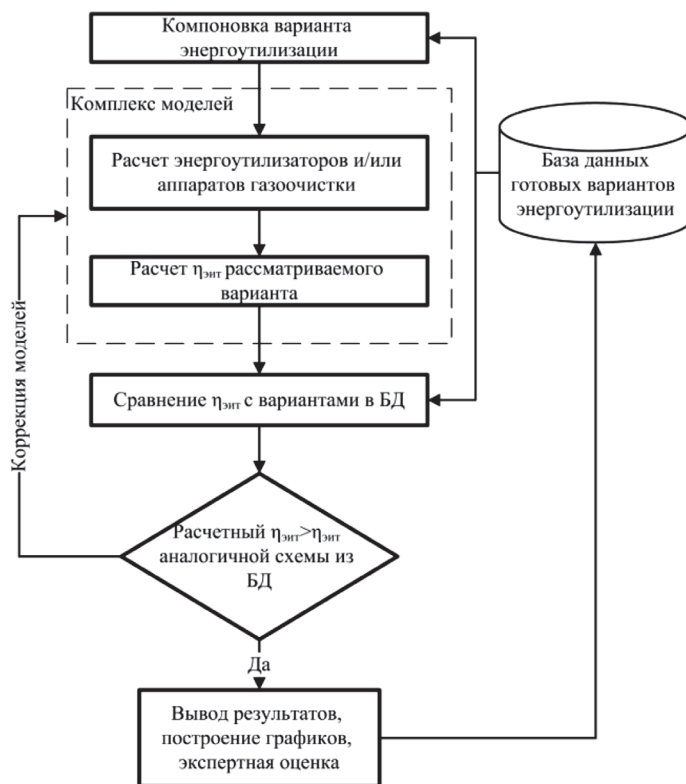


Рис. 4. Блок-схема алгоритма оптимизации энергоутилизационной схемы

Предположим, что каждый из N утилизирующих агрегатов характеризуется своим критерием оптимальности r_i . Эффективность всего варианта энергоутилизации оценивается суммарным значением $\Sigma \eta_{\text{ЭИТ}}$. Другими словами результирующий критерий оптимальности варианта энергоутилизации в целом является аддитивной функцией критериев оптимальности отдельных процессов, протекающих в каждом энергоутилизаторе $r_i(x_{i,1}, x_{i,2}, \dots x_{i,n})$:

$$\eta_{\text{ЭИТ}} = \sum_{i=1}^N r_i(x_{i,1}, x_{i,2}, \dots x_{i,n}) \rightarrow \max. \quad (2)$$

Задачей оптимизации является отыскание такого распределения функций, при котором критерий оптимальности $\Sigma \eta_{\text{ЭИТ}}$ в целом имел бы максимальное значение.

Выполнить проект любого варианта утилизации энергии отходящих газов, основанного на одном из подходов, весьма не простая задача. Перспективным способом решения этой задачи является моделирование процессов теплообмена и газодинамики на ЭВМ, что позволяет существенно сократить трудоемкость и избежать многих ошибок при проектировании и оценки. Таким образом, при помощи представленных алгоритмов можно находить оптимальную конструкцию каждого энергоутилизатора, сравнивать и выбирать схемы утилизации энергии по сквозному коэффициенту использования энергии исходного топлива.

Список использованных источников

1. Лебедев А.А., Галкин В.И., Роменец В.А. Экономическая эффективность бескоксовых схем производства металла на предприятиях металлургической и горной промышленности в различных ценовых условиях / А.А. Лебедев, В.И. Галкин, В.А. Роменец // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2003. – № 9. – С. 73–77.
2. Войнов А.П., Зайцев В.А., Куперман Л.Н. и др. Котлы-утилизаторы и энерготехнологические агрегаты / А.П. Войнов, В.А. Зайцев, Л.И. Куперман, Л.Н. Сидельковский. – М.: Энергоиздат, 1989. – 272 с.
3. Цымбал В.П., Мочалов С.П., Оленников А.А. От самоорганизующегося струйно-эмульсионного реактора до энергометаллургического комплекса / В.П. Цымбал, С.П. Мочалов, А.А. Оленников // Черные металлы. – 2010. – № 5. – С. 17–23.
4. Оленников А.А., Цымбал В.П. Моделирование структур утилизации энергии отходящих газов металлургических агрегатов / Моделирование, программное обеспечение и наукоемкие технологии в металлургии: Труды 3-й Всероссийской научно-практической конференции / Под ред. С.П. Мочалова, В.П. Цымбалы. – 2011. – С. 281–287.